
SIMULASI NUMERIK II : DISTRIBUSI DIAMETER DROPLET PADA SEMPROTAN BIODIESEL KELAPA, JATROPA CURCAS DAN MINYAK GORENG BEKAS DALAM RUANG BAKAR MEXICAN HAT

I Gede Teddy Prananda Surya

Teknik Mesin Universitas Udayana

Jl. Raya Kampus UNUD, Kampus Bukit Jimbaran, Jimbaran
Kabupaten Badung, Bali, Indonesia

teddyps@gmail.com

Abstrak

Biodiesel merupakan bahan bakar terbarukan dengan properties hampir menyerupai diesel fuel dan dapat digunakan pada motor diesel direct injection tanpa perubahan sistem bahan bakarnya. Bahan baku biodiesel yang tersedia di Indonesia antara lain kelapa, jatropha curcas dan minyak goreng bekas dapat diubah menjadi biodiesel melalui proses esterifikasi. Penelitian numerik menggunakan FLUENT 6.2 ini dilakukan pada model ruang bakar mexican hat untuk mengetahui distribusi ukuran droplet serta visualisasi semprotan dari ketiga jenis biodiesel tersebut. Pemodelan turbulen yang digunakan adalah RNG k- ϵ karena dapat memprediksi struktur large scale yang diproduksi oleh semprotan dan squish flow sedangkan pemodelan break-up menggunakan WAVE karena semprotan ini berlangsung dalam angka Weber yang tinggi. Hasil numerik membuktikan bahwa biodiesel minyak goreng bekas memiliki droplet berdiameter lebih besar daripada biodiesel kelapa atau jatropha curcas karena memiliki tegangan permukaan tinggi. Diameter partikel akan berkurang saat penetrasi semakin jauh karena pengaruh gaya aerodinamik yang bekerja pada droplet dan droplet tadi pecah setelah bertumbukan dengan dinding piston.

Kata kunci : diameter droplet, SMD, biodiesel

Abstrak

Biodiesel is a renewable fuel with almost changeable properties for diesel fuel and can be used in direct injection diesel motors without changing the fuel system. The raw materials for biodiesel available in Indonesia include coconut, jatropha curcas and used cooking oil that can be converted into biodiesel through an esterification process. This numerical study using FLUENT 6.2 was carried out on the Mexican hat combustion chamber model to see the droplet size distribution as well as to visualize the spray of the three types of biodiesel. The turbulent modeling used is RNG k- ϵ because it can predict large-scale structures produced by spray and squish flow while break-up modeling uses WAVE because this spray takes place in high Weber numbers. The numerical results prove that used cooking oil biodiesel has larger diameter droplets than coconut or jatropha biodiesel because it has a high surface tension. The particle diameter will decrease as the penetration gets stronger due to the influence of the aerodynamic force acting on the droplet and the droplet breaks after colliding with the piston wall.

Keywords : droplet diameter, SMD, biodiesel

PENDAHULUAN

Biodiesel merupakan sumber energi alternatif yang dapat digunakan untuk mengurangi ketergantungan terhadap bahan bakar fosil yang persediaannya semakin terbatas. Keunggulan lain dari biodiesel adalah bahan bakar ini ramah lingkungan karena diproduksi dari hewan atau tumbuhan dan pengembangan bahan bakar nabati di beberapa negara dilakukan menggunakan tanaman lokal sebagai *feedstock* [[1],[2]]. Indonesia dengan sumber daya alam melimpah memiliki beberapa sumber bahan baku biodiesel antara lain kelapa, jatropa curcas bahkan minyak goreng bekas. Melalui proses esterifikasi atau transesterifikasi yang tepat maka biodiesel tersebut dapat memiliki properties menyerupai *diesel fuel*.

Nilai kalor dalam biodiesel lebih kecil daripada *diesel fuel* sedangkan viskositas biodiesel umumnya melebihi viskositas *diesel fuel* sehingga diperlukan penelitian lanjut mengenai karakteristik semprotannya agar proses pembakaran berlangsung sempurna. Proses atomisasi semprotan *full cone* pada *sac nozzle* dijelaskan Baumgarten [[3]]. Ketika meninggalkan nozzle, jet mulai *breakup* membentuk semprotan yang bersudut. *Primary breakup* adalah *breakup* pada awal semprotan dan menghasilkan ligamen serta droplet yang membentuk *dense spray* sekitar nozzle. Pada injeksi tekanan tinggi, kavitasi dan turbulen dalam lubang injeksi adalah penyebab awal mekanisme *breakup*. Perbedaan kecepatan relatif antara droplet dan gas akan menimbulkan gaya aerodinamik yang dapat memperlambat laju droplet dan menyebabkan droplet pecah menjadi lebih kecil, peristiwa ini dinamakan *secondary breakup*. Droplet sekitar *spray tip* memiliki gaya drag paling besar dan kecepatannya lebih lambat daripada droplet dalam area *wake* sedangkan droplet dengan energi kinetik rendah didorong ke arah radial dan membentuk semprotan bagian terluar hingga membentuk sudut semprotan. Fasa liquid banyak terdapat di sekitar sumbu semprotan daripada di bagian luar semprotan, kecepatan droplet tertinggi berada pada daerah sumbu dan berkurang ke arah radial akibat interaksi droplet dengan gas. Dense spray memiliki peluang sangat besar untuk *collision* yang dapat menyebabkan kecepatan dan ukuran droplet berubah menjadi lebih kecil atau bergabung menjadi besar yang biasa disebut *coalescence*.

Ketika biodiesel disemprotkan dalam ruang bakar maka akan terbentuk droplet dan berukuran besar akan mengalami *breakup*. Hal ini sangat penting untuk membentuk semprotan yang sempurna. Azzopardi [[4]] telah melakukan eksperimen menggunakan kamera kecepatan tinggi. Hasil eksperimen menunjukkan hal menarik bahwa

mekanisme *breakup* tidak sama pada setiap angka Weber. Angka Weber rendah menyebabkan droplet tipis pada bagian tengah lalu pecah dimulai dari bagian tersebut sedangkan pada Weber tinggi *breakup* dimulai dari tepi droplet. Hwang dkk [[5]] melakukan eksperimen untuk mempelajari karakteristik semprotan seperti sudut semprotan, penetrasi spray tip dan SMD. Menggunakan injektor berdiameter 0,2, 0,3, 0,4 mm. tekanan injeksi yang digunakan 35 Mpa dan tekanan udara yang digunakan 0,6, 0,1, 1,5 Mpa. Dalam penelitian ini diketahui bahwa kenaikan tekanan gas menyebabkan sudut semprotan bertambah dan mengurangi penetrasi. Hasil eksperimen ini dibandingkan dengan teori dan hasil eksperimen peneliti lainnya dan menunjukkan hasil yang serupa yaitu kenaikan tekanan *ambient* dan diameter nozzle meningkatkan SMD pada arah *downstream*. Penetrasi spray tip ini merupakan faktor penting untuk menentukan desain ruang bakar sebuah motor diesel.

Metoda Sauter Mean Diameter digunakan untuk perhitungan ukuran droplet rata-rata. Didefinisikan sebagai diameter droplet yang mempunyai volume sama dengan rasio luas permukaannya pada keseluruhan semprotan.

$$SMD = \frac{\sum nD^3}{\sum nD^2} \dots\dots\dots (1)$$

Ukuran butiran-butiran droplet yang dihasilkan oleh semprotan selalu berbeda untuk setiap jenis biodiesel. Ukuran droplet rata-rata tergantung dari properti biodiesel berupa tegangan permukaan, densitas dan viskositas cairan serta parameter injeksi berupa laju aliran massa, tekanan injeksi dan tekanan gas. Interaksi semprotan dengan dinding telah dipelajari oleh Alloca dkk [[6]] melalui eksperimen terhadap injeksi tekanan tinggi pada pelat datar berjarak 20 mm dari nozzle dan kondisi tekanan atmosfer serta temperatur *ambient* telah diteliti menggunakan stroboflash-CCD camera. Bahan bakar yang digunakan dalam penelitian ini adalah ISO 4112 dengan viskositas 2,5 cst pada temperatur 40 °C dan tegangan permukaan 0.0284 N/m pada temperatur 80 °C.

Menurut Naber dan Farell [[7]], regim tumbukan didasarkan atas angka Weber, dimana untuk angka Weber > 130 tumbukan akan berada pada regim *splash* sedangkan angka Weber < 130 menunjukkan tumbukan akan berada pada regim *spread*. Regim *spread* adalah suatu kondisi tumbukan dimana droplet dalam semprotan akan meluncur dipermukaan dinding dan menjauh dari lokasi tumbukan hingga energi kinetiknya habis. Sedangkan regim *splash* adalah kondisi tumbukan dimana droplet akan pecah dan memantul setelah menumbuk

dinding sehingga terbentuk butiran-butiran dengan ukuran yang lebih kecil.

$$We_{imp} = \frac{\rho V_{imp}^2 d}{\sigma} \dots\dots\dots (2)$$

Beberapa eksperimen menjelaskan bahwa proses penyemprotan bahan bakar sangat penting dalam motor diesel, proses ini mencakup atomisasi, *collision*, *coalescence* dan *breakup*, momentum, energi dan interaksi droplet dengan dinding. Karakteristik semprotan bahan bakar dipengaruhi oleh beragam parameter dan memiliki proses cukup rumit. Untuk mengetahui semprotan bahan bakar lebih rinci maka diperlukan bantuan CFD. Validasi eksperimen dan numerik dilakukan oleh Reitz dan Rutland [[8]] dalam penelitian menggunakan motor diesel silinder tunggal Caterpillar 3406. Tipe piston yang digunakan adalah Mexican Hat berdiameter 137,19 mm dan pemodelan KIVA menggunakan submodel untuk mempelajari karakteristik semprotan hingga gas sisa pembakaran. Hasil penelitian menunjukkan bahwa pemodelan turbulensi yang tepat adalah RNG k-ε karena dapat memprediksi struktur large-scale yang terbentuk oleh gerakan squish dan spray.

Pemodelan numerik untuk mempelajari panjang break-up dan ukuran droplet pada dua tipe *pressure-swirl atomizer* yang bekerja dalam tekanan ambient dilakukan oleh Senecal dkk [[9]] dengan bantuan software KIVA-3V. Dalam penelitian ini persamaan Rosin-Ramler digunakan untuk perhitungan distribusi diameter droplet, persamaan Lagrangian untuk perhitungan jejak droplet dan setiap droplet diasumsikan memiliki properti kinematik dan termodinamika yang sama. Droplet collision dan coalescence diselesaikan menggunakan persamaan O'Rourke dan *secondary breakup* menggunakan Taylor Analogy Breakup (TAB) sedangkan persamaan fasa gas menggunakan algoritma Lagrangian-Eulerian (ALE). Fluida kerja yang digunakan adalah Stoddard Solvent sebanyak 14 dan 44 mg. Hasil numerik dari kedua jenis injektor ini serupa dengan eksperimen sebelumnya dan menunjukkan *linear stability analysis* dalam pemodelan *pressure swirl atomizer* dipengaruhi oleh udara dalam chamber, tegangan permukaan dan viskositas bahan bakar serta persamaan yang digunakan dalam KIVA-3V tersebut dapat memprediksi penetrasi semprotan, SMD dan visualisasi dengan akurat.

Dalam atomisasi bahan bakar menggunakan *pressure-swirl atomizer*, interaksi antara injektor dengan semprotan bahan bakar merupakan hal yang penting. Schmidt dkk [[10]] memberikan penjelasan akurat mengenai hal tersebut melalui pemodelan yang

dikenal dengan nama Linearized Instability Atomization (LISA) yang bertujuan sebagai prediksi bentuk semprotan dekat nozzle tip. LISA memiliki tiga tahap, yaitu pembentukan film, lapisan tipis dan atomisasi. Pemodelan ini diterapkan untuk mempelajari penetrasi, sudut, flux massa dan visualisasi semprotan *pressure-swirl injector* berdiameter 560 μm dan 458 μm yang bekerja dalam ambient pressure dengan pasokan bahan bakar 56.8; 20 dan 69 mm³. Dengan menggunakan TAB sebagai pemodelan *secondary breakup*, RNG k-ε sebagai pemodelan turbulen dan collision serta coalescence diselesaikan menggunakan metoda O'Rourke. Proses semprotan ini diselesaikan secara transient dan membuktikan bahwa prediksi numerik sesuai dengan hasil eksperimen, droplet pada awal injeksi berukuran besar sedangkan pada akhir injeksi terjadi perbedaan antara numerik dan eksperimen yang disebabkan karena *injector closing* tidak dapat diselesaikan dalam kasus transient.

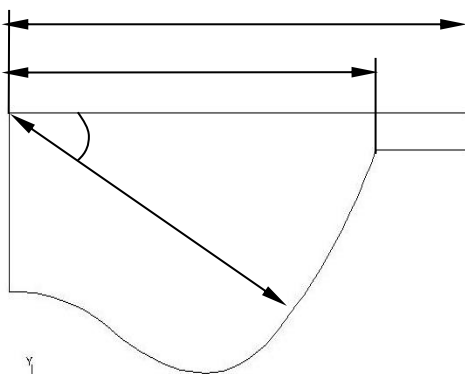
METODOLOGI

Bahan bakar yang digunakan pada penelitian ini adalah biodiesel Kelapa, Jatropha Curcas dan Minyak Goreng Bekas, Tabel 1. Bahan bakar ini diinjeksikan menggunakan nozzle berdiameter 0,22 mm dengan laju massa bahan bakar 5,9 gr/s. Pada simulasi menggunakan FLUENT 6.2 ini tekanan injeksi yang digunakan adalah 200 bar sedangkan tekanan ruang bakar 6 bar.

Tabel 1 Hasil pengujian bahan bakar di PT. Pertamina Surabaya 2006

Propertis	Sat	ASTM Test Method	Diesel Fuel	Hasil Pengujian Biodiesel		
				Kelapa	J.C.	MGB
Density at 15°C	kg/m ³	D 1299	863	880.4	906.6	915.2
Kinematic Viscosity at 40°C	mm ² /s	D 445	3.694	7.78	17.85	37.53
Tegangan Permukaan	N/m ²	---	-	0.0621	0.0699	0.073

Tipe ruang bakar yang digunakan adalah submodel Mexican Hat dengan nozzle-dinding berjarak 58,4 mm. Ruang bakar ini umumnya digunakan pada motor diesel putaran rendah dengan daya yang besar.



Gambar 1 Pemodelan ruang bakar tipe Mexican Hat

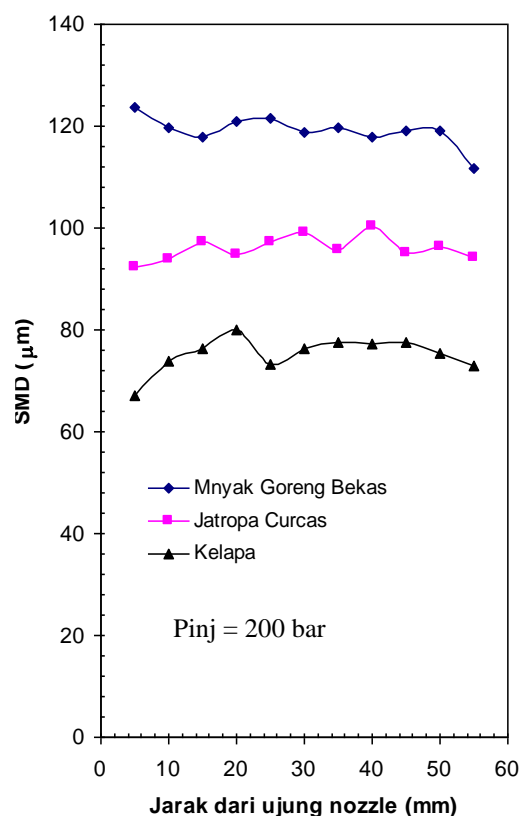
HASIL DAN PEMBAHASAN

Sauter Mean Diameter merupakan metoda yang digunakan untuk menentukan diameter droplet rata-rata. Semakin kecil tegangan permukaan maka biodiesel tersebut akan memiliki droplet berdiameter kecil karena tegangan permukaan berguna untuk mempertahankan bentuk droplet mengatasi gaya drag saat bergesekan dengan udara dan diameter tersebut semakin berkurang sepanjang arah penetrasi akibat bergesekan dengan udara, gambar 3. Pada jarak penetrasi 0 hingga 40 mm terjadi fluktuasi perubahan diameter droplet yang disebabkan oleh *collision* dan *coalescence* antar droplet tersebut. Pada penelitian ini biodiesel Kelapa memiliki SMD terkecil 67,1 hingga 80,1 μm . Hal ini terjadi karena biodiesel tersebut memiliki tegangan permukaan 0.0621 N/m^2 , lebih kecil daripada Jatropa curcas dan Minyak Goreng Bekas.

Perilaku semprotan menumbuk dinding pada umumnya dipengaruhi oleh ukuran droplet, kecepatan tumbukan dan kondisi permukaan dinding. Parameter tak berdimensi yang menentukan jenis tumbukan adalah Weber Number. Gambar 4, 5, 6 menunjukkan bahwa biodiesel Kelapa, Jatropa curcas dan Minyak Goreng Bekas dengan jarak nozzle tip-dinding 58,4 mm memiliki regim tumbukan yang beragam. Dengan menggunakan persamaan (2) diketahui bahwa Kelapa memiliki angka Weber 125,6, Jatropa Curcas 107,2 dan Minyak Goreng Bekas 148,5. Hal ini menunjukkan bahwa pada semprotan dengan tekanan injeksi 200 bar dan tekanan ruang bakar 6 bar hanya Minyak Goreng Bekas yang memiliki regim splash karena angka Weber > 130.

Berdasarkan Naber dan Farel [[7]], biodiesel Minyak Goreng Bekas dapat membentuk regim *splash* sementara biodiesel lainnya hanya memiliki

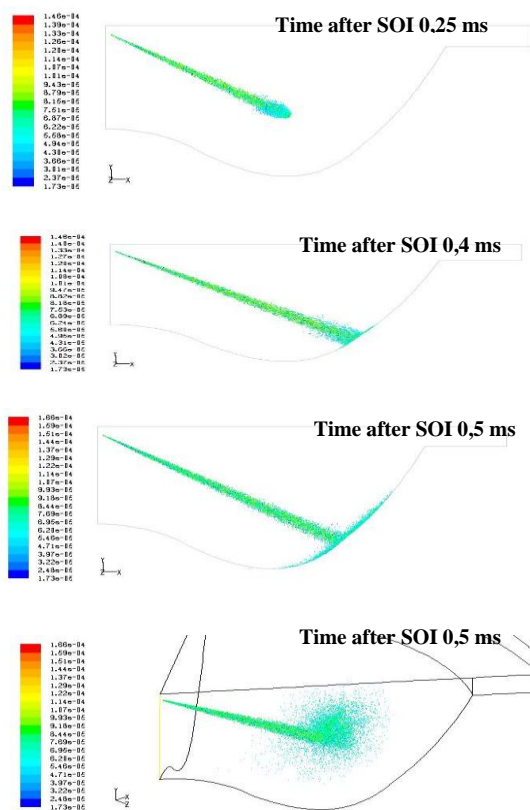
regim *spread*. Dengan demikian semakin tinggi tekanan injeksi, regim tumbukan semakin cenderung ke regim *splash*. Fenomena regim tumbukan dari ketiga biodiesel terjadi karena biodiesel Minyak Goreng Bekas memiliki densitas besar 915,2 kg/m^3 dan tegangan permukaan yang tinggi 0,072 N/m^2 dimana tegangan permukaan tersebut mempertahankan bentuk droplet agar tidak *breakup* saat bergesekan dengan udara.



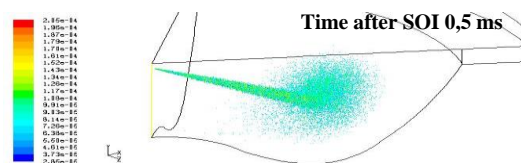
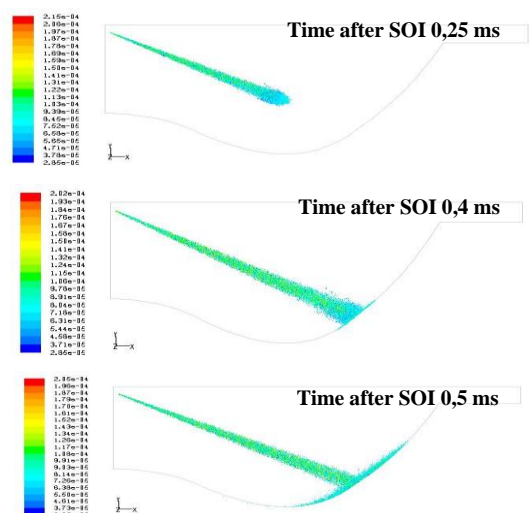
Gambar 2 Distribusi diameter droplet pada semprotan biodiesel

Gambar 3, 4 dan 5 membuktikan bahwa biodiesel dengan viskositas besar menyebabkan jarak penetrasi lebih jauh karena droplet memiliki tegangan permukaan lebih besar. Biodiesel Kelapa memiliki jarak penetrasi terpendek karena dropletnya mudah *breakup* dan sudut semprotan menjadi lebih besar karena droplet di tepi semprotan memiliki energi lebih kecil dan mengalami *breakup* lebih cepat. Dengan penjelasan mengenai regim tumbukan pada ketiga jenis biodiesel ini, dapat dipahami bahwa regim tumbukan *splash* yang diciptakan biodiesel Minyak Goreng Bekas sangat baik untuk tipe ruang bakar Mexican Hat. Regim splash ini sangat menguntungkan bagi proses atomisasi lanjutan

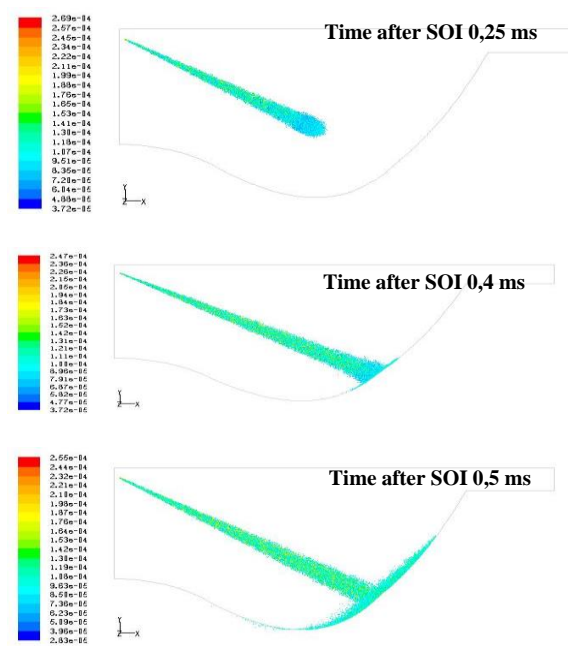
setelah menumbuk dinding, sehingga proses pembakaran berlangsung lebih baik.



Gambar 3 Visualisasi droplet pada biodiesel Kelapa



Gambar 4 Visualisasi droplet pada biodiesel Jatropa Curcas



Gambar 5 Visualisasi droplet pada biodiesel Minyak Goreng Bekas

KESIMPULAN

Minyak Goreng Bekas merupakan sumber bahan baku biodiesel yang baik untuk motor diesel putaran rendah karena memiliki viskositas dan tegangan permukaan yang dapat menghasilkan regim splash saat menumbuk dinding piston. Proses semprotan biodiesel pada arah *downstream* akan mengami *collision* membentuk droplet berdiameter lebih kecil atau *coalescence* sehingga droplet berdiameter besar. Proses ini tidak sama pada setiap biodiesel sehingga setiap semprotan biodiesel memiliki karakteristik penetrasi, sudut atau diameter

droplet beragam. Penelitian lebih lanjut mengenai biodiesel Kelapa dan Jatropha Curcas dapat dilakukan pada motor diesel putaran tinggi yang menggunakan regim spread untuk mengawali pembakaran.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Saydut, A., Duz, M. Z., Kaya, C., Kafadar, A. B. dan Hamamci, C., "Transesterified Sesame (Sesamum Indicum L.) Seed Oil as a Biodiesel Fuel", Bioresource Technology Vol. 99, hal. 6656–6660, 2008.
- [2] Sun, H., Ding, Y., Duan, J., Zhang, Q., Wang, Z., Lou, H. dan Zheng, X., "Transesterification of Sunflower Oil to Biodiesel on ZrO₂ Supported La₂O₃ Catalyst", Bioresource Technology Vol. 101, hal 953–958, 2010.
- [3] Baumgarten, C., "Mixture Formation in Internal Combustion Engines", Springer-Verlag Berlin Heidelberg, Germany, 2006.
- [4] Azzopardi, B. J., "Atomization Fundamentals," Department of Chemical Engineering, University of Nottingham, 1991.
- [5] Hwang, J.S., HA, J.S. dan No, S. Y., "Spray Characteristics of DME in Conditions of Common Rail Injection System", International Journal of Automotive Technology, Vol. 4, No.3 hal. 119, 2003.
- [6] Alloca, L., Amato, U., Bertoli, C. dan Corcione, F. E., "Comparison of Models and Experiments for Diesel Fuel Sprays", International Symposium COMODIA90:255-261, 1990.
- [7] Naber, J. D. dan Reitz, R. D., "Modeling Engine Spray/Wall Impingement", SAE 88107, 1988.
- [8] Reitz, R. D. dan Rutland, C. J., "Development and Testing of Diesel Engine CFD Models", Prq Energy Cumhusr. Sri. Vol. 21, hal. 173-196, 1995.
- [9] Senecal, P.K., Schmidt, D.P., Nouar, I., Rutland, C.J., Reitz, R.D. dan Corradin, M.L., "Modeling high-speed viscous liquid sheet atomization", International Journal of Multiphase Flow, Vol. 25, hal.1073-1097, 1999.
- [10] Schmidt, D.P., Nouar, I., Senecal, P.K., Rutland, C.J., Martin, J. K. dan Reitz, R.D., "Pressure-Swirl Atomization in the Near Field", SAE 1999-01-0496, 1999.